

Titolo della tesi

STUDIO DI FATTIBILITÀ PER UN
IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA
TRAMITE BIOMASSE
NEL COMUNE DI SANTA LUCE, PISA

di

Laura Barsotti

Tesi proposta per il conseguimento del titolo accademico di

DOTTORE IN INGEGNERIA MECCANICA

presso la

Facoltà di Ingegneria

della

Università degli Studi di Pisa

Data della laurea

SINTESI (Tesi Lunga)

Autore:

Laura Barsotti

.....

Approvata da:

Prof. Ing. Paolo Di Marco

.....

Prof. Ing. Sandro Paci

.....

Arch. Federico Pennesi

.....

Ing. Francesco Morelli

.....

1. INTRODUZIONE

Nella presente analisi, si considera il territorio comunale di Santa Luce, situato nella parte meridionale e collinare della Provincia di Pisa, come zona di produzione e sfruttamento di biomassa al fine di generare energia elettrica.

Partendo dalla disponibilità di biomassa stessa, si è verificata la possibilità di alimentare un impianto di produzione di energia elettrica, alimentato da fonti rinnovabili, esaminando le varie tecnologie esistenti e valutandone l'opportunità rispetto allo specifico scenario.

Una speciale attenzione è stata posta al bilancio energetico globale, dal prelievo da campo o bosco della biomassa tal quale, all'immissione in rete dell'energia prodotta, sottolineando quei passaggi necessari ed inevitabili per un corretto ed efficiente funzionamento dell'intero impianto e filiera.

Si è valutata la convenienza all'utilizzo delle biomasse a fini energetici, in particolare, in riferimento alla logistica (ad esempio, costi di trasporto e stoccaggio, che possono fortemente incidere sui costi del materiale alla bocca dell'impianto), ai sistemi di produzione di energia (tra i vari aspetti, il tipo e le dimensioni degli impianti e la forma del materiale di alimentazione degli stessi) e ai costi di produzione (sia in relazione a combustibili convenzionali, in genere fossili, che alla possibile applicazione delle varie forme di incentivo previste per le fonti energetiche rinnovabili, quali le biomasse).

2. SVOLGIMENTO

2.1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

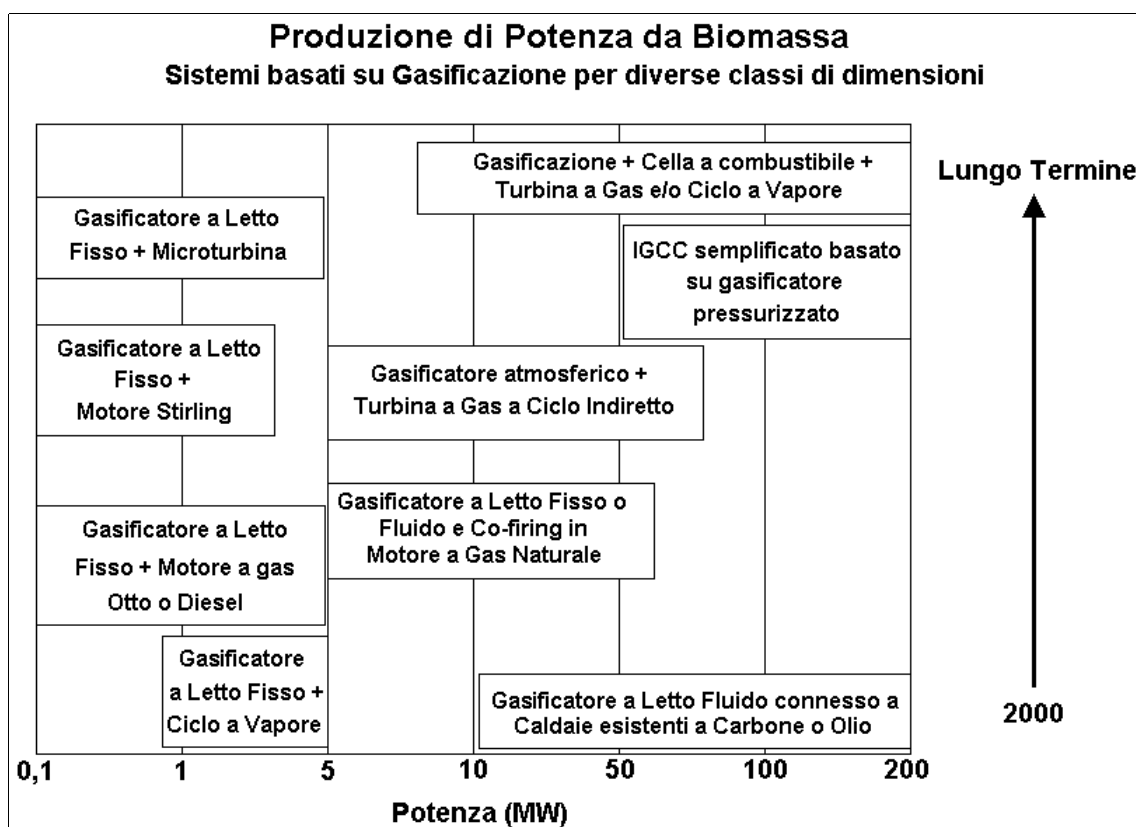
Rispetto al problema in esame, è stato necessario valutare preventivamente tre aspetti fondamentali:

- il territorio, in termini di risorse, infrastrutture e disponibilità;
- l'inquadramento legislativo vigente, sia nazionale che a livello di Comunità Europea, soprattutto per ciò che concerne le fonti energetiche rinnovabili, la loro promozione e sviluppo, le forme di incentivo e di supporto economico, sia per la ricerca che per un effettivo utilizzo;
- le risorse tecnologiche disponibili, tra cui individuare il processo più idoneo per lo scenario considerato.

Queste ultime hanno rappresentato il fondamentale punto di partenza dell'analisi.

Infatti, fissato un desiderato output di circa 1 MW di potenza elettrica, la soluzione attuale è individuata dalla gasificazione della biomassa, cioè la sua conversione in

combustibile gassoso, per alimentare un sistema di generazione di energia elettrica a combustione interna o esterna.



1. Visione d'insieme delle soluzioni tecnologiche possibili

Inoltre, si sono definiti alcuni termini fondamentali per la trattazione, quali Biomassa, Biocombustibile, Bioenergia, filiera biomassa-energia, sviluppo locale, sostenibilità e integrazione.

In particolare, la filiera biomassa-energia può essere rappresentata in cinque fasi principali:

- Raccolta;
- Trasporto, stoccaggio;
- Pretrattamento;
- Conversione;
- Utilizzo, distribuzione.

2.2 SEQUENZA LOGICA DELL'ANALISI

Dopo aver scelto il processo di conversione, si è passati all'analisi, seguendo una sequenza logica:

- Biomassa: natura, disponibilità, energia coinvolta nell'approvvigionamento.
- Gasificazione: principi chimici e processi tecnologici.
- Generazione di potenza elettrica.

- Considerazioni logistiche e possibile disposizione dell'impianto.
- Stime economiche-finanziarie.

2.2.1 BIOMASSA: NATURA, DISPONIBILITÀ, ENERGIA COINVOLTA NELL'APPROVVIGIONAMENTO

In base a dati disponibili sul territorio, le tipologie di biomassa individuate per lo sfruttamento sono gli scarti della coltura dei cereali (paglia) e materiale forestale proveniente dallo sfruttamento a ceduo del bosco demaniale presente nel territorio del comune, di proprietà della Regione Toscana.

Sono stati, altresì, recuperati dati chimico-fisici e agroforestali riguardanti le biomasse, ricavando dei valori medi per tenere conto della varietà delle fonti e della necessità di stimare la maggior parte di questi dati, dal momento che la pratica richiede la conoscenza mediante rilevazione sperimentale degli stessi.

Per le due tipologie, si sono ricavati i seguenti valori:

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl (%)	Ceneri (%)	PCI (kJ/kg)
Paglia	45,79	5,67	42,68	0,66	0,14	0,45	5,99	17.170
Legno	49,24	5,76	43,55	0,32	0,05	0,45	3,32	18.490

2. Tabella riassuntiva dei valori chimico-fisici delle biomasse considerate (sostanza secca)

Residui cerealicoli

Produttività (t/ha)	4
Umidità tal quale (%)	20
Superficie coltivata a cereali (ha)	2.435,7

Biomassa legnosa

Incremento corrente (m³/ha)	3
Fitomassa viva ss (t/ha)	80,43
Necromassa (m³/ha)	9,27
Numero esemplari (n/ha)	1.878
Area basimetrica (m²/ha)	15,7

3. Tabelle riassuntive dei valori agroforestali delle biomasse considerate

Da questi dati, si è calcolati il potenziale energetico ricavabile per anno dalla sostanza secca. Per la biomassa legnosa, si è dovuto preventivamente analizzare il problema dello sfruttamento in un'ottica assestata: volendo utilizzare in modo sostenibile il bosco, ogni anno se ne può estrarre una quantità pari al solo incremento corrente dell'intera superficie boscata disponibile. Perciò, si è calcolata l'estensione ottimale delle particelle annue, verificandone anche il rispetto della durata di un turno, cioè ogni quanti anni una particella può essere tagliata a raso.

Successivamente, si sono individuate le tecniche diffuse e più adatte alla raccolta ed al trasporto della biomassa, dal luogo di produzione (campo o bosco) al luogo di trattamento e utilizzo. Nello specifico, si sono analizzate sia le spese economiche che quelle energetiche dei processi: trasporto per la paglia, elaborando uno schema di calcolo basato sulle distanze tra campi e impianto; taglio, esbosco, primo trattamento (cippatura)

e trasporto per il legno, con schemi analoghi per l'esbosco ed il trasporto.

A questo punto, esaminando la tecnologia di conversione scelta (gasificazione e combustione del gas prodotto), ci si è resi conto dell'opportunità di alimentare il reattore di gasificazione con un materiale più uniforme e a maggiore densità energetica, rispetto alla paglia trinciata e il legno in chips, senza contare la necessità di poter dosare con esattezza il combustibile in quantità e, soprattutto, in qualità: nella fattispecie, avendo un combustibile, per così dire, ibrido, costituito di biomasse di due tipi, è necessario che le proporzioni relative dei due materiali deve essere il più costante possibile. Perciò, si è fatto riferimento alle forme densificate di biomassa oggi più diffuse: il pellet ed il bricchetto. Per le sue dimensioni ridotte e la movimentazione più agevole, si è optato per il pellet.

Al desiderato output di circa 1MW di energia elettrica corrispondono circa 8 GWh prodotte, cui corrisponde un consumo orario di circa 1,25 t/h. Il territorio comunale ha capacità produttiva di biomassa adeguata: in particolare, è stata determinata come opportuna una proporzione di 63% di residui agricoli e il 37% di biomassa forestale.

Per quanto riguarda la densificazione della biomassa legnosa, dato l'elevato contenuto di umidità nel tal quale (circa 35%), si deve procedere ad essiccare il materiale fino a valori più contenuti (intorno a 10%), al fine del buon funzionamento della linea di pellettizzazione. Si può osservare che la spesa energetica relativa all'essiccazione non è necessariamente un valore da sottrarre all'energia prodotta, ma, anzi, può andare a tutto vantaggio del processo, se si sceglie di usare un essiccatoio a recupero, alimentato dal calore reflu del motore in cui brucia il gas di sintesi, e l'impianto non è già totalmente utilizzato per la cogenerazione.

Riassumendo:

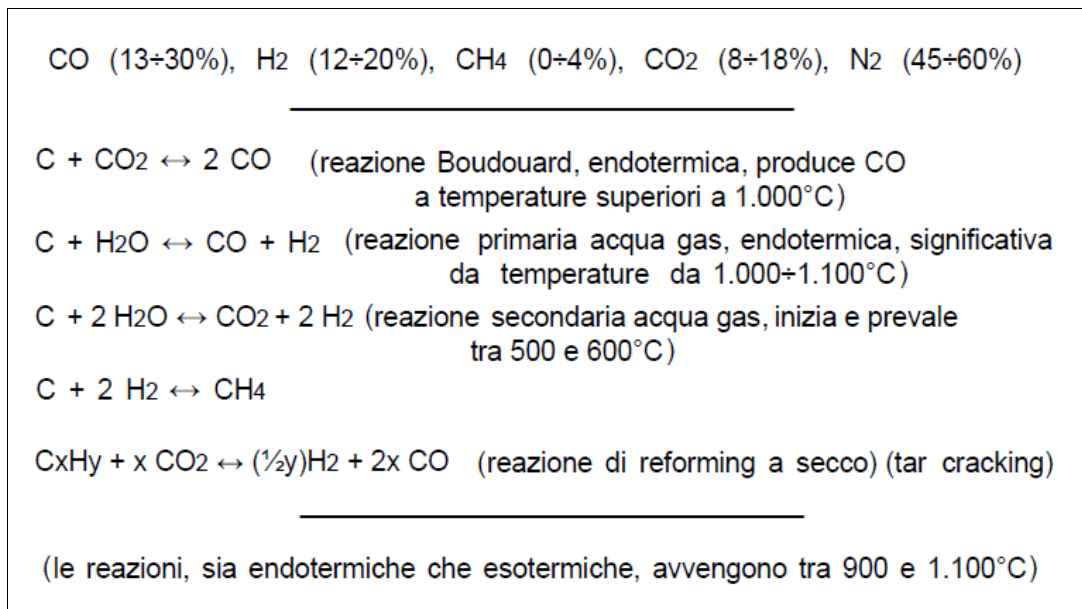
	Biomassa Legnosa	Residui agricoli
<i>Raccolta</i>	0,45%	–
<i>Trasporto</i>	0,77%	0,33%
<i>Essiccazione</i>	7,05%	–
<i>Densificazione (Pellet)</i>	0,75%	1,29%
TOTALE	9,02%	1,62%
<i>Contenuto energetico totale (MJ)</i>	68.415	108.171
<i>Spesa (MJ)</i>	6,17	1,75

4. Spesa energetica totale relativa all'approvvigionamento di biomassa

2.2.2 GASIFICAZIONE: PRINCIPI CHIMICI E PROCESSI TECNOLOGICI

La gasificazione è una speciale forma di combustione, rispetto alla quale, però, temperature più elevate e scarsa presenza di ossigeno (proveniente dall'aria o da una

specifica fonte) conducono a una incompleta ossidazione dei composti volatili, con formazione di gas di sintesi (syngas) a basso potere calorifico (da 4.186 a 6.279 kJ/Nm³) o, in opportune condizioni (con solo ossigeno come coreagente), a medio potere calorifico (da 6.279 a 16.744 kJ/Nm³), ossia una miscela di CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂O, N₂, con presenza di ceneri, catrame (tar) e altri residui carboniosi (char).



5. Composizioni medie del syngas e reazioni principali di gasificazione

Nel processo, si possono individuare tre fasi: la prima, di pirolisi, durante la quale la biomassa è convertita mediante calore in carbonella e composti volatili, come vapore acqueo, metanolo, acidi acetici e catrami, anche se lo scopo è di raggiungere la cosiddetta pirolisi veloce, cioè spingere verso prodotti gassosi leggeri, invece di catrami, e seguente cracking degli idrocarburi pesanti già formati. La seconda consiste nella reazione esotermica in cui parte del carbonio è ossidato a anidride carbonica. Infine, nella terza, parte del CO₂, i composti volatili e il vapore sono ridotti a CO, H₂ e CH₄. Le reazioni endotermiche si alimentano con il calore prodotto da quelle esotermiche: in particolare, una parte del carbonio presente nella biomassa in ingresso brucia producendo calore per alimentare tali reazioni.

Alcune peculiari proprietà chimico-fisiche delle biomasse lignocellulosiche, quali l'elevata volatilità, la spiccata reattività del carbonio, il basso contenuto di ceneri e di zolfo, le rendono particolarmente adatte al processo di gasificazione. Inoltre, la gasificazione del legno, rispetto ad altri materiali (ad esempio, il carbone), ha il vantaggio di potere avvenire a temperatura più bassa, in un tempo minore e con minori problemi di emissioni e di corrosione delle pareti dell'impianto.

Il sistema è, in genere, costituito dal reattore vero e proprio, da un sistema di

filtrazione e raffreddamento del gas, la cui funzione è fondamentale per eliminare catrame e altre impurità generate dalla combustione se il gas è destinato alla produzione di energia elettrica, da un sistema di controllo e da un sistema di manipolazione e gestione dei residui liquidi e solidi.

La classificazione del tipo di impianto fa riferimento alla tecnologia del reattore e, indirettamente, alle dimensioni consigliate; le categorie sono le seguenti:

- *Letto fisso (fixed bed)*: conveniente per basse potenzialità (fino a 10 MWe); si distingue, a sua volta, in *controcorrente (updraft)* e *equicorrente (downdraft)*, a seconda della direzione del moto del comburente rispetto alla biomassa (tipologia adatta per il caso in esame);
- *Letto fluido bollente (BFB, boiling fluidised bed)*: appropriata per applicazioni di media scala (15-40 MWe);
- *Letto fluido circolante (CFB, circulating fluidised bed)*: appropriata per applicazioni di grande scala (40-100 MWe);
- Varianti avanzate a letto fluido: *reattore a “doppio letto” (dual bed)* per gasificazione pirolitica a vapore con riscaldamento indiretto; *reattore pressurizzato*; data la loro complessità, sono convenienti solo per taglie medio-elevate (da 30÷50 MWe in su).
- Reattori batch per usi speciali (ad esempio, il cosiddetto “*dissociatore molecolare*”).

Di seguito, è stata presentata una rassegna di alcuni modelli commerciali delle principali aziende produttrici con alcuni impianti già realizzati, secondo dati estratti direttamente da pubblicazioni effettuate dalle aziende in oggetto.

2.2.3 GENERAZIONE DI POTENZA ELETTRICA

Per la conversione da energia chimica, presente nel syngas, a quella elettrica da immettere in rete, si usa un genset, cioè dispositivi con motore e alternatore calettati sullo stesso albero, insieme ad un opportuno trasformatore. Il motore più idoneo allo scenario esaminando è a combustione interna basato su ciclo Otto. Le altre alternative attuali possibili (motore basato su ciclo Diesel o a combustione esterna ORC, ciclo Rankine organico) sono state scartate, sia per problematiche relative al combustibile (Diesel possibile se dual-fuel, con gasolio che avvia la combustione e syngas che la porta avanti), sia di inadeguata proporzione tra energia termica ed elettrica prodotte (ciclo ORC più adatto a scenari di cogenerazione, dato l'elevata quantità di calore generato, rispetto all'energia elettrica). Sono state, inoltre, escluse, quelle soluzioni che a tutt'oggi sono immature (microturbine e motori basati su ciclo Stirling) per una applicazione commerciale.

I motori a combustione interna basati su ciclo Otto sono, invece, adatti e di agevole applicazione, data la presenza sul mercato di modelli a gas “low-BTU”, cioè con basso potere calorifico, già dotati di tutti i dispositivi necessari all'utilizzo di combustibile gassoso.

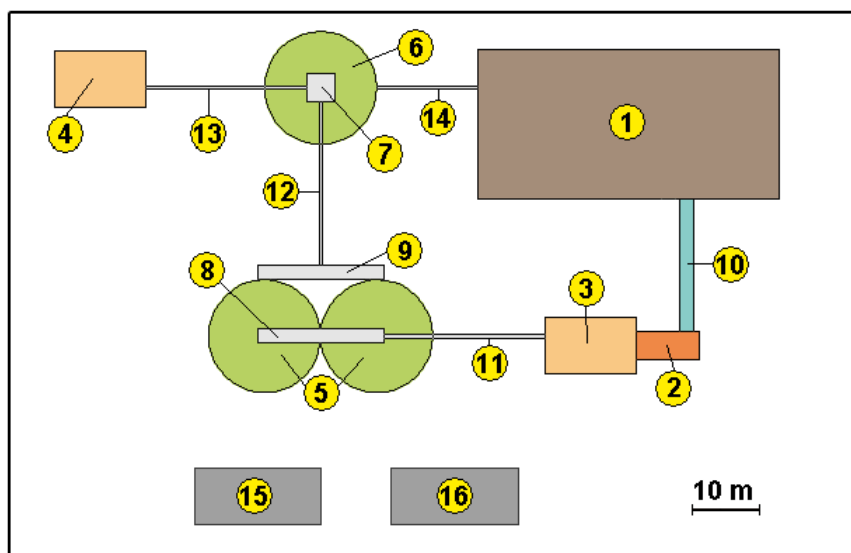
Di seguito, è stata presentata una rassegna di alcuni modelli commerciali delle principali aziende produttrici, con i relativi dati di funzionamento.

2.2.4 CONSIDERAZIONI LOGISTICHE E POSSIBILE DISPOSIZIONE DELL'IMPIANTO

La disponibilità dei due tipi di biomassa non è la stessa durante l'anno: infatti, mentre la paglia è sempre disponibile, il legno si può ottenere solo da metà ottobre a metà maggio. Da ciò si sono esaminate due soluzioni possibili: ottenere pellet costituiti di miscela fissa dei due tipi di biomassa oppure densificarli separatamente e alimentare il reattore con una miscela fissa dei pellet ottenuti. Dopo considerazioni sia economiche (necessità di una o due linee di densificazione), che, soprattutto, di stoccaggio (stoccare cippato essiccato o pellet di legna), hanno portato ad optare per la seconda soluzione.

Di seguito, si sono stimate le dimensioni sia dei silos di stoccaggio per il pellet, che delle linee di densificazione, con indicazione di modelli commerciali possibili, con relative caratteristiche.

Da ciò, è stato possibile stimare gli ingombri delle strutture e li si è confrontati con lo spazio disponibile, segnalato da parte delle autorità comunali. In seguito, si è realizzata una possibile planimetria di massima.



6. Planimetria di massima possibile

1. Edificio del gasificatore: oltre al reattore stesso, contiene tutta la batteria di filtri per il syngas prodotto ed i due motogeneratori.
2. Essiccatoio a recupero di calore del cippato di legna: deve essere prossimo ai genset, onde ridurre al minimo le perdite di calore dei fumi di scarico dei motori.

3. Linea di densificazione per pellet di legno: contiene tutti i macchinari necessari al processo di densificazione, dalla sbriciolatrice alla cubettatrice.
4. Linea di densificazione per pellet di paglia.
5. Sili per lo stoccaggio del pellet di legno.
6. Silo per lo stoccaggio della miscela di pellet di legno e di paglia: funziona come polmone tra le linee di densificazione e il reattore e come riserva per il funzionamento autonomo.
7. Dispositivo per la miscelazione dei due tipi di pellet.
8. Dispositivo per il riempimento progressivo dei sili per pellet di legno.
9. Dispositivo per lo svuotamento progressivo dei sili per pellet di legno.
10. Condotta coibentata per il trasporto dei fumi di combustione dai motogeneratori all'essiccatoio a recupero.
11. Trasportatore per il riempimento dei sili di pellet di legno.
12. Trasportatore per il trasporto del pellet di legno nel silo della miscela.
13. Trasportatore per il trasporto del pellet di paglia nel silo della miscela.
14. Trasportatore per l'alimentazione del gasificatore.
15. Edificio amministrativo.
16. Edificio dei servizi per il personale

2.2.5 STIME ECONOMICHE-FINANZIARIE

Seguono tabelle riassuntive dei dati ricavati. Per la retribuzione dell'energia elettrica prodotta si è fatto riferimento a: D.lgs. n.79 del 16 Marzo 1999 e successive modifiche per i Certificati Verdi e ritiro dedicato; Legge Finanziaria del 2008 (L. 24/12/2007 n.244) e decreto attuativo D.M. del 18 Dicembre 2008 per il regime di Conto Energia mediante tariffe omnicomprensive.

	<i>Certificati Verdi e ritiro dedicato</i>	<i>(valore attuale) 22 c€/kWh_e</i>	<i>(valore proposto) 28 c€/kWh_e</i>
Costo totale installazione impianto	4.025.000,00		
Costo annuale gestione impianto	834.000,00		
Ricavi totali	1.867.277,20	1.408.000,00	1.792.000,00
Utile netto annuale	1.033.277,20	574.000,00	958.000,00
NPV (tasso 7,45%, 5 anni, con imposizione fiscale)	-350.009,87	-1.838.532,58	-593.984,14
NPV (tasso 7,45%, 10 anni, con imposizione fiscale)	1.983.838,62	-543.942,07	1.569.526,19
Tempo di pareggio secondo PBT	(3,985) 4 anni	(7,012) 7 anni	(4,201) ~4 anni

7. Costi e ricavi totali (€) e indici di valutazione dell'investimento

L'analisi effettuata mediante gli indici scelti suggerisce di optare per il sistema dei Certificati Verdi con il ritiro dedicato dell'energia elettrica prodotta, rispetto alla tariffa omnicomprensiva attuale.

3. CONCLUSIONI

Il presente studio, riguardante la fattibilità di un impianto per la produzione di energia elettrica alimentato a biomassa, sia agricola che forestale, in località Stazione di Santa Luce nel Comune di Santa Luce (Pisa), presenta alcuni aspetti significativi. In primo luogo, l'ingente investimento iniziale, che però rientra nei parametri standard di 1 M€ per 25kW_e installati. Inoltre, grazie agli incentivi riservati alle fonti di energia rinnovabili, i ricavi sono elevati e tali da permettere un rapido ritorno del capitale in circa 4 anni. L'analisi ha, inoltre, mostrato l'opportunità della scelta del sistema di remunerazione dell'energia elettrica prodotta dei Certificati Verdi con il ritiro dedicato riservato alle fonti rinnovabili.

Durante l'analisi è emerso, inoltre, come tutte le tecnologie scelte quali più adatte all'impianto in esame, siano mature e permettano una discreta possibilità di scelta tra vari fornitori. L'unico ostacolo può, forse, essere rappresentato dalla scarsa diffusione di impianti simili nel nostro Paese: ostacolo facilmente superabile, dato il positivo clima che si respira in Italia a proposito di queste relativamente nuove applicazioni, rispetto ad altri Paesi, specialmente appartenenti all'Unione Europea, dove le normative vigenti scoraggiano l'ingresso dei fornitori di dispositivi di gasificazione.

Un ultimo dato, tutt'altro che trascurabile, ma che, anzi, assume un ruolo fondamentale, è dato dai risvolti ambientali dell'esercizio dell'impianto: infatti, al netto delle spese energetiche sia di approvvigionamento di combustibile pronto per la gasificazione che di trasporto, si ottengono **risparmi di circa 4.144 TEP di combustibili fossili e di 10.713 t di emissioni di CO₂ ogni anno.**

Svolto a stretto contatto con le autorità locali del Comune di Santa Luce, lo studio ha anche evidenziato l'importanza decisiva della realizzazione dell'impianto anche sull'economia locale e sullo sviluppo del territorio: dai nuovi sbocchi per sottoprodotti agricoli di sfruttamento difficoltoso (la paglia) agli incentivi sostanziali per la conservazione e lo sfruttamento sostenibile del patrimonio forestale e territoriale. Così, si può assistere ad un processo di filiera corta, a tutto vantaggio della tracciabilità delle fonti.